

新疆阿尔泰塔拉特铁铅锌矿床流体包裹体研究及矿床成因*

李登峰^{1,2} 张莉^{1**} 郑义^{1,2}

LI DengFeng^{1,2}, ZHANG Li^{1**} and ZHENG Yi^{1,2}

1. 中国科学院矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

1. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2012-07-10 收稿, 2012-11-20 改回.

Li DF, Zhang L and Zheng Y. 2013. Fluid inclusion study and ore genesis of the Talate Fe-Pb-Zn deposit in Altay, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 178–190

Abstract The Talate Fe-Pb-Zn deposit is located in Abagong poly-metallic metallogenic belt of the Altay Orogen. The ore bodies, occur as veins in the Kangbutiebao Formation which contains intermediate-acid marine volcanic rocks and terrigenous clastic sedimentary-carbonate rocks, and are jointly controlled by faults. Considering the mineral assemblages and crosscutting relations of veinlets, the mineralization process can be divided into four stages, from early to late, forming the skarn minerals, veins of quartz-oxide (QO), quartz-sulfide (QS) and quartz-carbonate (QC) assemblages. Among them the quartz-sulfide (galena-sphalerite ± pyrrhotite ± chalcopyrite) stage is the main Pb-Zn mineralization stage. Four compositional types of fluid inclusions are observed at the deposit, i. e. aqueous inclusions (W-type), pure CO₂ inclusions (PC-type), CO₂-NaCl-H₂O inclusions (C-type) and daughter mineral-bearing inclusions (S-type). Microthermometric data and laser Raman analyses show that the quartz accompanying oxides contains all of the four inclusion types, with the W-type being predominant. They are mainly homogenized between 271 °C and 426 °C. The salinities of fluid inclusions of the W- and C-types range from 0.5% to 22.4% NaCleqv, and those of the S-type fluid inclusions from 30.5% to 40.6% NaCleqv. The quartz of quartz-sulfide stage contains the W-, C- and PC-types of fluid inclusions, which are homogenized at temperature of 204 ~ 269 °C, with salinities of 0.2% ~ 15.6% NaCleqv. The minerals of quartz-carbonate stage have only the W-type fluid inclusions yielding homogeneous temperature of 175 ~ 211 °C and salinities of 1.1% ~ 9.9% NaCleqv. The C-type fluid inclusions in quartz of the quartz-sulfide stage yield trapping pressures of 107 MPa to 171 MPa, corresponding to a depth of 4 ~ 6 km. Holistically, the fluids in the quartz-oxide and quartz-sulfide stages are hypothermal, CO₂-rich and high salinity, but in the quartz-carbonate stage are low salinity and CO₂-poor. Fluid immiscibility and/or boiling are the main factors resulting in precipitation of metallic minerals. The geology and ore-forming fluid characteristics presented in this paper shows that the Talate Fe-Pb-Zn deposit was a typical skarn-type mineralization system formed in the continental collision orogeny.

Key words Fluid inclusion; CO₂-rich fluid; Talate Fe-Pb-Zn deposit; Skarn deposit; Altay Orogen

摘要 塔拉特铁铅锌矿位于新疆阿尔泰造山带南缘的阿巴宫多金属成矿带,矿体赋存于克兰盆地泥盆统康布铁堡组中,为一套海相中酸性火山岩-火山碎屑岩-陆源碎屑沉积岩-碳酸盐岩建造。脉状矿体受阿巴宫大断裂次级断裂控制。根据矿物组合和脉体穿插关系,塔拉特铁铅锌矿可分为4个成矿阶段:矽卡岩、氧化物、硫化物和碳酸盐阶段,后3个阶段均有石英共生。其中,硫化物(方铅矿-闪锌矿±磁黄铁矿±黄铜矿)阶段是铅锌成矿的主要阶段。不同阶段石英中广泛发育流体包裹

* 本文受国家973项目(2007CB411303)和国家自然科学基金项目(41072062)联合资助。

第一作者简介:李登峰,男,1987年生,硕士生,矿床学专业,E-mail: lidengfeng_gig@163.com

** 通讯作者:张莉,女,1973年生,博士,副研究员,从事成矿流体研究,E-mail: zhangli@gig.ac.cn

体,可分为水溶液包裹体(W型)、纯CO₂包裹体(PC型)、CO₂-NaCl-H₂O包裹体(C型)及含子矿物多相包裹体(S型)4类。冷热台显微测温 and 激光拉曼分析表明,氧化物阶段石英含有4种类型的包裹体,以W型为主,C型和S型包裹体次之,包裹体均一温度介于271~426℃,W型和C型盐度范围0.5%~22.4% NaCleqv,S型包裹体盐度30.5%~40.6% NaCleqv;硫化物阶段的石英流体包裹体为W型、C型和PC型,均一温度为204~269℃,盐度介于0.2%~15.6% NaCleqv之间;碳酸盐阶段的矿物只含W型包裹体,均一温度集中在175~211℃之间,盐度为1.1%~9.9% NaCleqv。利用C型包裹体对硫化物阶段成矿压力估算,得到107~171MPa,对应深度为4~6km。塔拉特铁铅锌矿初始成矿流体具有高温、高盐度、富CO₂的特征,但碳酸盐阶段低盐度、贫CO₂流体不混溶和混合作用导致了成矿物质的沉淀。塔拉特铁铅锌矿的地质和成矿流体特征显示其为碰撞造山体制形成的矽卡岩型成矿系统。

关键词 流体包裹体;富CO₂包裹体;塔拉特铁铅锌矿;矽卡岩矿床;阿尔泰造山带
中图法分类号 P618.42; P618.43

浆控高温热液矿床(IRHD)涵盖了斑岩型、矽卡岩型、爆破角砾岩型和铁氧化物型矿床,主要产于岩浆弧、大陆碰撞带、走滑造山带或陆内裂解带(陈衍景等,2007; Chen *et al.*, 2007)。陈衍景和李诺(2009)总结了我国60个大陆内部浆控高温热液矿床成矿流体研究成果,指出大陆内部高温岩浆热液矿床的初始成矿流体具有高盐度、富CO₂的特征,如秦岭-大别地区的鱼池岭斑岩钼矿(Li *et al.*, 2012c)、金城堆斑岩钼矿(杨永飞等,2009)、三道庄矽卡岩型钼钨矿(石英霞等,2009)、祁雨沟爆破角砾岩型金矿(Chen *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2012a)、南泥湖斑岩钼钨矿(Yang *et al.*, 2012)、寨洼石英脉型钼铜矿(Deng *et al.*, 2012)、汤家坪斑岩钼矿(王运等,2009; Chen and Wang, 2011)、干鹊冲斑岩钼矿(Yang *et al.*, 2013),以及大兴安岭地区的乌奴格吐山斑岩铜钼矿(Li *et al.*, 2012b)等。

碰撞体制的成岩、成矿和流体作用模式(CMF模式)的提出(陈衍景和富士谷,1992),促进了我国大陆碰撞造山带矿床勘查和地质研究。研究发现,大陆内部断裂岩浆带和陆内活化造山带是浆控热液矿床的有利环境(Chen *et al.*, 2007; Pirajno, 2009)。陆内活化造山带多缘于大陆板块边缘的地质作用,尤其是陆缘俯冲挤压或碰撞挤压的远距离效应,使大陆板块内部古老造山带再度活化造山,发生岩浆活动而形成浆控高温热液矿床(陈衍景和李诺,2009)。

新疆阿尔泰克兰盆地中已发现矿床具有矿种齐全、组合多样、多期次叠加的特征,如阿巴宫铁矿(刘锋等,2009)、铁木尔特铅锌矿(耿新霞等,2010; Zhang *et al.*, 2012b)、托莫尔特铁锰矿(杨富全等,2012)等。塔拉特铁铅锌矿位于阿尔泰造山带南缘的克兰盆地中,是一个以铅锌为主、伴生银铁铜的多金属矿床,已探明铅锌资源量达中型规模(袁建江等,2011),勘查工作仍在持续。塔拉特铁铅锌矿地质研究比较薄弱,成矿受断裂控制,并遭受区域变质作用影响,目前缺乏矿床地球化学和流体包裹体等辅证资料,致使矿床成因类型无法准确厘定,前人提出了VMS型(袁建江等,2011)和火山气液喷流沉积改造型(马忠美等,2001; 提拉古丽,2009)的观点。

本文选取塔拉特铁铅锌矿不同阶段的石英脉型矿石进行流体包裹体研究,系统研究了流体包裹体热力学和成分特

征,并结合矿床地质特征和岩相学观察,提出了塔拉特铁铅锌矿床成矿流体和矿床成因类型的新认识。

1 区域地质特征

塔拉特铁铅锌矿位于阿尔泰造山带南缘多金属成矿带中克兰火山-沉积盆地内(图1),大地构造背景为西伯利亚板块阿尔泰南缘晚古生代活动陆缘弧后拉张盆地(何国琦等,1995; 王京彬等,1998; 陈衍景,2000; Chen *et al.*, 2001; 肖文交等,2006; Sun *et al.*, 2008; Wan *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2012)。克兰盆地内主要出露地层为中上志留统库鲁姆提组、下泥盆统康布铁堡组、中泥盆统阿勒泰镇组。库鲁姆提组为一套混合岩、片麻岩夹变质砂岩,片岩组合,与上覆的康布铁堡组断层接触;康布铁堡组为一套海相中酸性火山岩-火山碎屑岩、陆源碎屑沉积岩-碳酸盐岩建造;阿勒泰镇组为一套变质粉砂岩、变质砂岩、云母石英片岩和千枚岩组合。上述地层单元之间多为断层接触(图1),发生变质和多期次岩浆侵入活动,区域变质程度达到绿片岩相,特征变质矿物组合为黑云母-绿泥石-绿帘石-阳起石。区内侵入岩为奥陶纪、二叠纪、三叠纪和少量侏罗纪中酸性侵入岩(图1中未区分时代)。

克兰盆地及其主构造均呈NW-SE向,以阿勒泰复式向斜为主体,轴长50km,轴面倾向NE,倾角50°~70°,NE翼倒转,SW翼正常。向斜核部主要发育中泥盆统阿勒泰镇组,向两翼依次为康布铁堡组和库鲁姆提组。次级褶皱轴线走向与主构造线一致,以紧闭的线性褶皱为主,NE翼多数次级褶皱发生倒转。盆地内NW断裂构造发育,且多沿不同地层单元之间的边界发育,呈现断裂控制地层发育的特征。例如,克因宫断裂和阿克巴斯套断裂构成志留系与泥盆系的边界,克因宫断裂和阿勒泰断裂总体表现为康布铁堡组与阿勒泰镇组的边界(图1)。尤其重要的是,断裂构造还控制了矿床的空间分布,其中,阿巴宫断裂控制着大东沟铅锌矿、乌拉斯沟铅锌矿、乌拉斯沟铜矿、恰夏铁铜矿、萨热阔布金矿、铁木尔特铅锌矿、托莫尔特铁锰矿、阿巴宫铁矿和塔拉特铁铅锌矿等(图1)。克兰盆地内康布铁堡组变质流纹岩中SHRIMP锆石U-Pb年龄为413~407Ma(Chai *et al.*, 2009)。

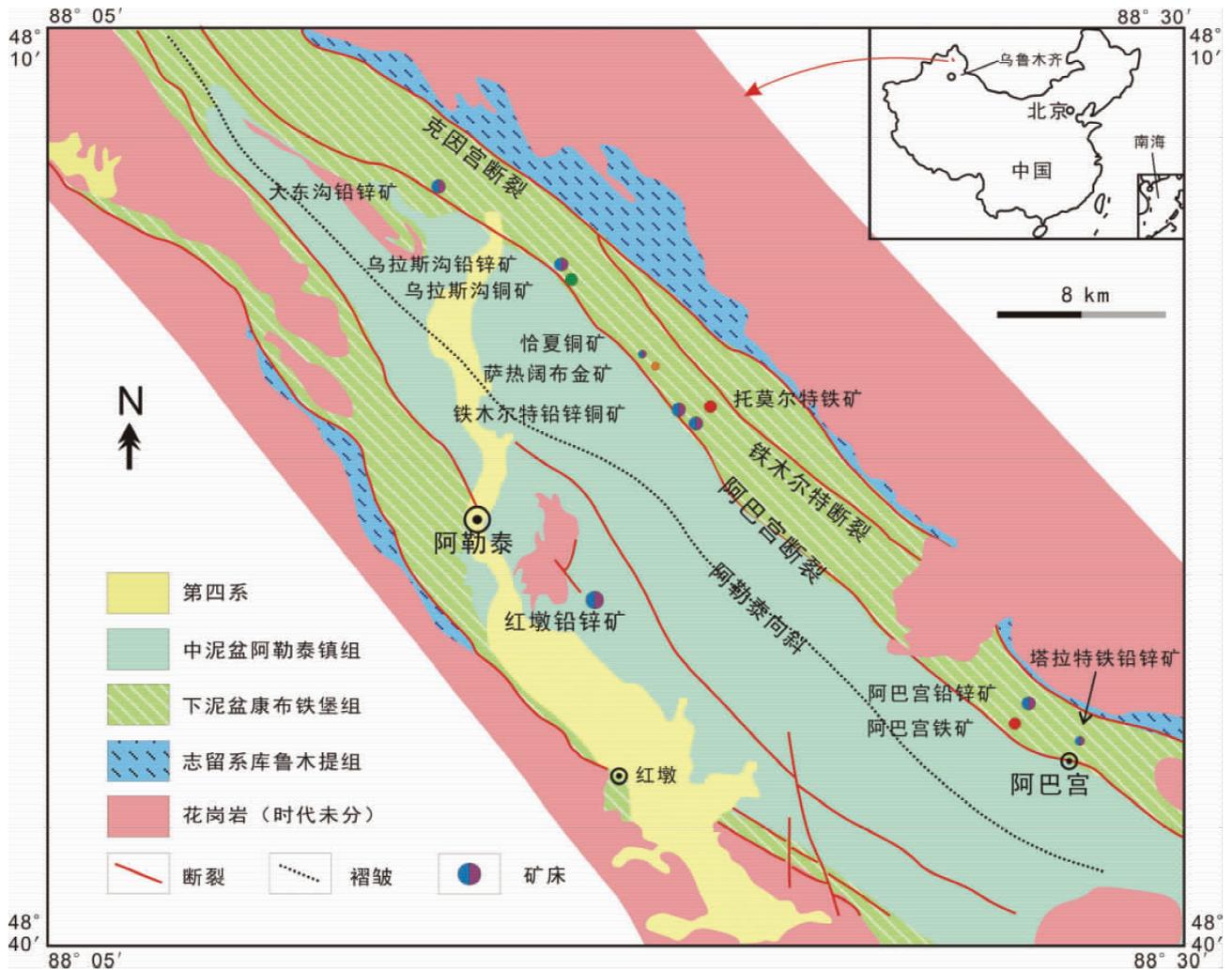


图1 阿尔泰山南缘克兰盆地区域地质及矿产分布图(据新疆有色706队,2005^①修改)

Fig.1 Geological map of Kelan basin, Altay, showing deposit distribution

2 矿床地质特征

矿区地层主要为下泥盆统康布铁堡组和中泥盆统阿勒泰镇组。康布铁堡组为一套流纹质晶屑凝灰岩、火山碎屑岩夹碳酸盐建造,并遭受了绿片岩相到角闪岩相的变质,形成于413~407Ma(Chai *et al.*, 2009);阿勒泰镇组是一套正常沉积岩夹火山碎屑岩。康布铁堡组分为上下两个亚组,其中下亚组又细分为三个岩性段,塔拉特铁铅锌矿赋矿层位为康布铁堡组下亚组第二岩性段($D_1K_1^2$) (图2),为一套变流纹质-英安质凝灰岩、变流纹质沉凝灰岩夹大理岩、砂岩、火山角砾凝灰岩(图3)。

区内断裂构造发育,以克因宫断裂最为突出,断裂走向

与区域主构造线方向一致,断层产状较陡,倾角均大于 70° ,甚至达 90° ,具高角度逆断层特征。阿巴宫多金属成矿带位于构造破碎带中。

塔拉特铁铅锌矿邻近区域岩浆活动强烈,主要为海西期斜长花岗岩,分别为喇嘛昭岩体(约 $276 \pm 9\text{Ma}$,王涛等,2005)和阿巴宫岩体(约 $462.5 \pm 3.6\text{Ma}$ 和 $457.8 \pm 3.1\text{Ma}$,刘锋等,2008)。岩体与围岩接触界线明显,接触带可见矽卡岩化。

塔拉特铁铅锌矿整体沿北西方向展布,与断层和地层走向基本一致。北西段出露的矿体为Fe和Fe-Pb-Zn矿体,南东段为Fe-Pb-Zn矿体(图2)。南矿段单矿体最厚达11m,走向延长约920m;Zn品位为1.14%~13.47%,平均2.24%;Pb品位0.51%~24.81%,平均2.03%;具有Zn>Pb的特

^① 新疆有色706队.2005.克兰盆地找矿靶区优选及铜矿定位预测

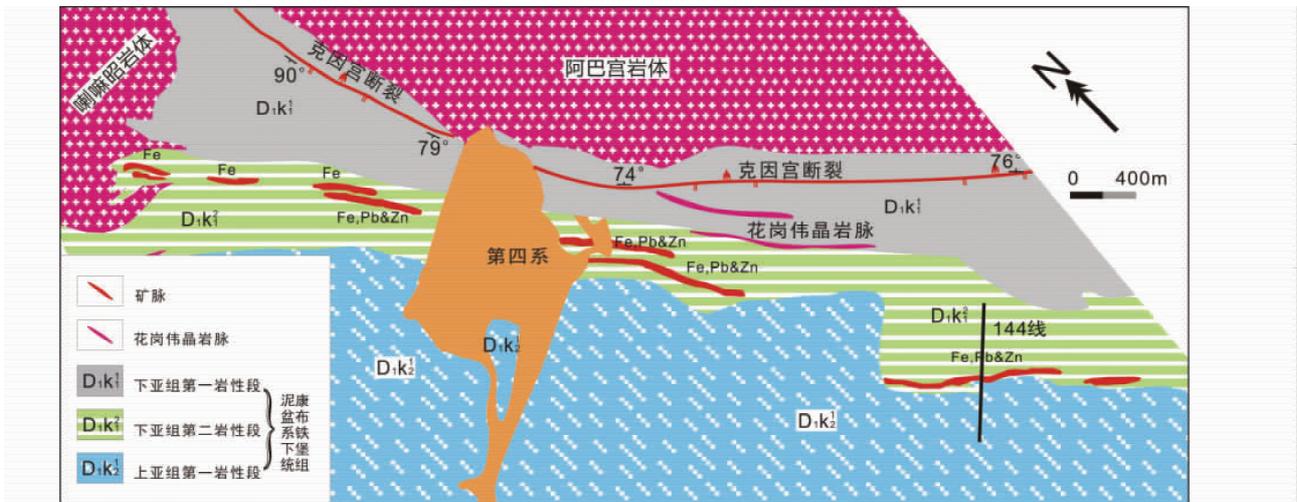


图2 塔拉特铁铅锌矿床地质简图(据袁建江等, 2011 修改)

Fig.2 Geological sketch map of Talate Fe-Pb-Zn deposit (modified after Yuan et al., 2011)

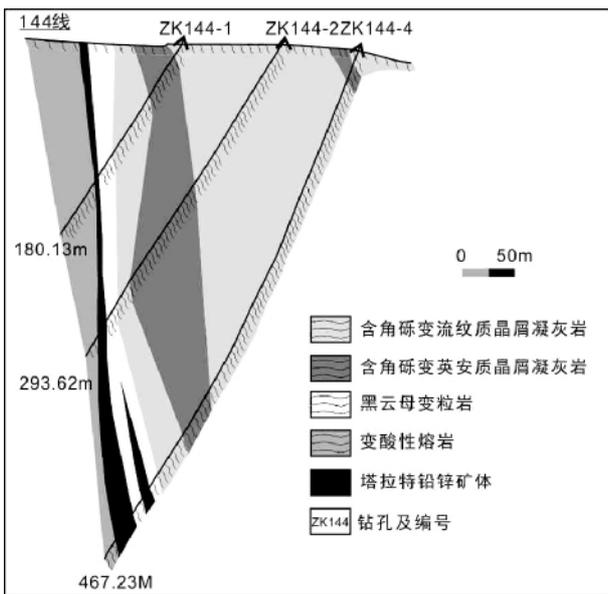


图3 塔拉特铁铅锌矿矿体剖面图(据袁建江等, 2011 修改)

Fig.3 Geological profiles orebodies of the Talate Fe-Pb-Zn deposit (modified after Yuan et al., 2011)

点。矿体主要赋存于黑云母变粒岩、含角砾变英安质凝灰岩或变流纹质凝灰岩中, 矿体呈脉状或透镜状。

矿石中的金属矿物主要有闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿等; 脉石矿物有石英、透闪石、阳起石、石榴子石、电气石、绿泥石、绿帘石、方解石、黑云母等。矿石构造主要有块状、浸染状、条带状、细脉状等。矿石结构主要为自形-半自形结构、交代残余结构、碎裂结构、侵蚀结构等。矿石的结构构造显示, 矿床经历了强烈的热液交代作用。

围岩蚀变主要为矽卡岩化、硅化和黄铁矿化。矽卡岩化主要矿物组合为石榴子石、透闪石、阳起石、角闪石、绿泥石、绿帘石等。黄铁矿化呈现两种不同形态, 一种受应力作用影响, 呈角砾状; 另一种呈自形粒状, 具有完好立方体晶型。

根据脉体穿插关系、矿石结构和矿物组合, 将成矿作用划分为矽卡岩阶段(图 4a-c)、(石英-氧化物阶段(图 4d-f)、(石英-硫化物阶段(图 4g-i)和(石英-碳酸盐阶段(图 4j, k)。

矽卡岩阶段包括干矽卡岩阶段和湿矽卡岩阶段, 干矽卡岩阶段形成大量石榴子石和少量透辉石, 石榴子石粒度较粗, 多遭受后期交代蚀变或热液矿物充填(图 4a); 湿矽卡岩阶段形成含水硅酸盐矿物组合, 如角闪石、透闪石、阳起石(图 4c)、绿帘石等。氧化物阶段的主要矿物组合为磁铁矿-石英及少量黄铁矿, 石英(Q1)呈脉状或角砾状(图 4d), 矿相学显示磁铁矿和石英具有良好的裂开-愈合结构(Sibson et al., 1988)(图 4f)。在反射光下, 磁铁矿充填于石榴子石等脉石矿物晶间或颗粒中, 显示出磁铁矿形成晚于石榴子石(图 4e)。硫化物阶段以发育多样式的石英-硫化物网脉为特征, 金属矿物主要有闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿和毒砂等硫化物; 黄铁矿等硫化物多充填于石英粒间, 与石英紧密共生, 或呈脉状, 脉体宽约 10~20mm(图 4g)。可见黄铁矿、黄铜矿细脉穿切、充填于含石榴子石等脉石矿物晶间或裂隙中(图 4i), 说明硫化物形成晚于石榴子石; 黄铁矿、方铅矿与闪锌矿共生组合关系可见图 4l, 闪锌矿中可见线状细颗粒黄铜矿, 是由黄铜矿交代闪锌矿时形成, 黄铜矿形成晚于闪锌矿(Barton and Philip, 1987; 周兵等, 1999)。矿物可能的生成顺序为石榴子石-磁铁矿-闪锌矿-方铅矿-黄铁矿, 最后形成黄铜矿。碳酸盐阶段以石英-方解石脉(Q3)为代表(图 4j), 脉体平直, 矿物组合简单, 可含有少量黄铁矿(图 4k)。

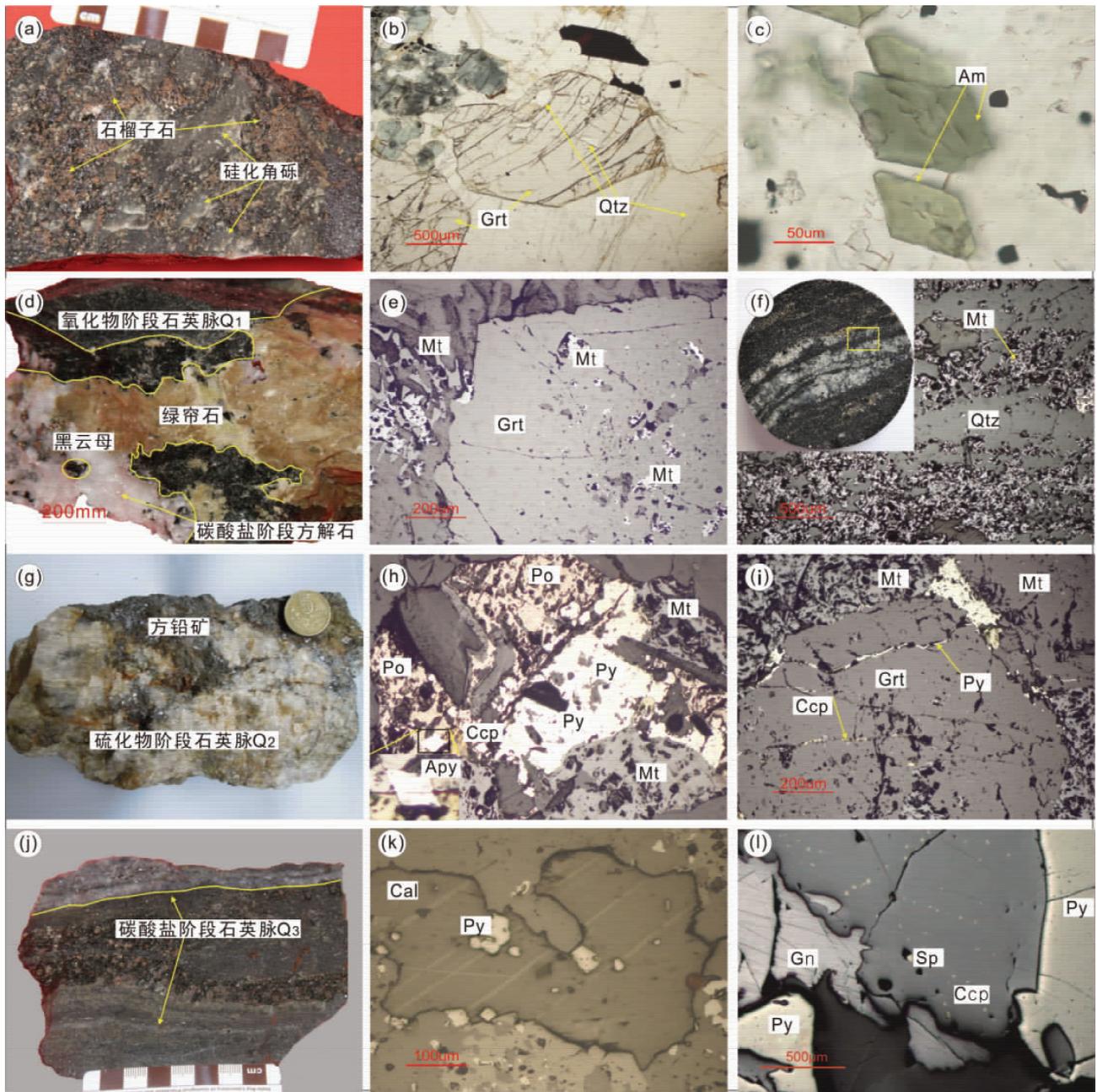


图4 塔拉特铁铅锌矿床矿石样品和矿物组合照片

(a) 石榴子石砂岩含硅化角砾; (b) 自形粒状石榴子石, 部分被后期石英充填交代; (c) 单偏光镜下自形柱状角闪石; (d) 氧化物阶段石英脉(Q1) 伴随绿帘石化、石榴子石化; (e) 磁铁矿充填于石榴子石等脉石矿物晶间或颗粒中; (f) 一条带状磁铁矿-石英脉; (g) 硫化物阶段石英脉(Q2) 含方铅矿; (h) 多金属硫化物交代氧化物阶段磁铁矿; (i) 黄铁矿、黄铜矿细脉充填于石榴子石等脉石矿物晶间或颗粒中; (j) 碳酸盐阶段石英脉(Q3); (k) 碳酸盐阶段方解石和黄铁矿; (l) 不同硫化物共生. 矿物缩写: Am-角闪石; Apy-毒砂; Cal-方解石; Cpy-黄铜矿; Gn-方铅矿; Grt-石榴子石; Mt-磁铁矿; Po-磁黄铁矿; Py-黄铁矿; Qz-石英; Sp-闪锌矿

Fig. 4 Photographs showing ore samples and mineral assemblage of the Talate Fe-Pb-Zn deposit

(a) -garnet skarn with silicification breccia; (b) -euhedral garnet is replaced by quartz partly; (c) -euhedral columnar amphibole under plane-polarized light; (d) -brecciated quartz veinlet (Q1) in the quartz-oxide stage, accompanied by epidotization and garnetization; (e) -magnetite filling gangue minerals such as garnet; (f) -banded magnetite-quartz veins; (g) -quartz-pyrite veins (Q2) in the QS stage; (h) -magnetite in quartz-oxide stage is replaced by the quartz-polymetallic sulfides; (i) -pyrite and chalcopyrite stringer filling gangue minerals; (j) -quartz veins (Q3) in the quartz-carbonate stage; (k) -calcite and pyrite of the quartz-carbonate stage; (l) -co-existing sulfides. Abbreviations: Am-amphibole; Apy-arsenopyrite; Cal-calcite; Cpy-chalcopyrite; Gn-galena; Grt-garnet; Mt-magnetite; Po-pyrrhotite; Py-pyrite; Qz-quartz; Sp-sphalerite

3 流体包裹体研究

3.1 样品特征及研究方法

研究样品采自塔拉特铁铅锌矿南段矿体,挑选具有代表性且涵盖不同成矿阶段的样品 57 件。将样品磨制呈双面抛光,厚度约为 300~900 μm 的薄片,通过矿相学和流体包裹体岩相学的观察,选取具有代表性的 7 个包裹体薄片中共 296 个包裹体进行显微热力学分析。

流体包裹体冷热台分析在中国科学院地质与地球物理研究所流体包裹体实验室完成,使用 Linkam THMSG600 和 THMSG1500 冷冻-加热系统,与一台德国 Zeiss 显微镜匹配观察包裹体形态、大小及相态的变化等完成测定实验。热电偶用美国 FLUID INC. 的标准样品进行校正,校正的温度为 -56.6 $^{\circ}\text{C}$ 、0.0 $^{\circ}\text{C}$ 和 374.1 $^{\circ}\text{C}$ 。包裹体先以 -5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率降温到 -100 $^{\circ}\text{C}$,保持 1min 以确保完全被冻住,后以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 -60 $^{\circ}\text{C}$,保持 1min,降低速率至 0.5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,并在温度降低到 -56.6 $^{\circ}\text{C}$ 时保持 1min。随后以 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温到 -10 $^{\circ}\text{C}$,保持 1min 后以 1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升温到 10 $^{\circ}\text{C}$ 。然后以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 速率升温至 150 $^{\circ}\text{C}$ 后降低升温速率到 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 直到完全均一,相变点附近降低速率(约 0.5~1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$) 到足以观察到临界点的变化。NaCl-H₂O 体系的包裹体盐度通过冰点和 Bodnar(1993) 冰点与盐度关系表查得。CO₂-NaCl-H₂O 体系包裹体的盐度则通过笼合物熔化温度和 Collins(1979) 提供的方法计算获得。含 NaCl 子晶的包裹体盐度根据子晶熔化温度和盐度换算表查出(卢焕章等,2004)。

单个包裹体成分激光拉曼显微探针测试在中国科学院地质与地球物理研究所拉曼光谱实验室完成。采用法国 Jobin Yvon 公司生产的 LabRAM-HR 可见显微共焦拉曼光谱仪,用 Ar⁺ 离子激光器,波长 532nm,输出功率为 44mW,所测光谱的计数时间为 3s,每 1 cm^{-1} (波数) 计数一次,100~4000 cm^{-1} 全波段一次取峰,激光束斑大小约为 1 μm ,光谱分辨率 0.65 cm^{-1} 。标准样品使用的是法国生产纯硅片,对峰值进行校正,硅片的标准拉曼位移是 520.7 cm^{-1} ,特征峰值参照 Frezzotti *et al.* (2012)。

3.2 流体包裹体岩相学

氧化物阶段的石英脉显示较强的变形特征,呈团块状或透镜状(图 4d),该阶段石英在镜下具有波状消光的特征。硫化物阶段石英呈脉状(图 4g),含有较多的硫化物,较之氧化物阶段变形作用减弱。石英碳酸盐阶段(图 4j)的石英脉较平直,具有晶簇状或梳状构造,指示石英生长在开放环境中,遭受变形变质作用较弱。

根据包裹体的成分及室温下(22 $^{\circ}\text{C}$)的相态(卢焕章,2004;陈衍景等,2007)划分为 4 种基本类型(图 5)。

水溶液包裹体(W型):此类包裹体在各阶段均有出现。常温下呈气液两相,氧化物阶段气泡体积较大,可占整个包

裹体体积 20%~30% 左右,硫化物阶段气泡的体积大小不一,分布在 10%~30% 的范围,碳酸盐阶段气泡体积减小到 5%~10% 之间,碳酸盐阶段 W 型包裹体多数能见到气泡的跳动。多数 W 型包裹体长轴长度从 6 μm 至 20 μm 不等。W 型包裹体多成群分布,包裹体形态多样,呈椭圆形,三角形和负晶型及不规则状。

纯 CO₂ 包裹体(PC型):见于氧化物、硫化物阶段,成群分布。多为只含纯气相 CO₂ 的包裹体,也有气相和液相共存的包裹体,体积分数达 50%~90%,是典型的富气相包裹体。形态多以长条形、椭圆形和负晶型为主,颜色多见黑色、褐色、褐黑色,大小为 4~18 μm 。

CO₂-NaCl-H₂O 包裹体(C型):这类包裹体发育于氧化物、硫化物阶段的石英脉中,成群分布或者孤立分布。包裹体常呈三角形,长条形,负晶型及不规则状产出,大小为 5~38 μm 。包裹体 CO₂ 相比比例一般在 40%~70%(图 5e),室温下多呈两相,降温过程中可呈现三相(“双眼皮”)结构(图 5d)。

含子矿物多相包裹体(S型):这类包裹体见于氧化物阶段的石英脉中,一般 5~20 μm ,个别可达 40 μm ,成群分布,多为长条形或椭圆形。透明子晶矿物各不相同,多为 NaCl 子晶(图 5a),也含有 KCl 子晶(图 5f)。NaCl 子晶矿物具有立方体晶型,无色透明,约 1 μm 大小,KCl 子晶具有浑圆状外形,透明未知矿物无固定外形,升温过程中无变化。S 型包裹体中黑色不透明矿物疑似黄铁矿(图 5c)。

3.3 流体包裹体显微测温

本次研究共获得 298 件包裹体测温数据,实验涉及包裹体的完全均一温度范围在 175~426 $^{\circ}\text{C}$ 之间,只有极个别的包裹体的完全均一温度在 400 $^{\circ}\text{C}$ 以上,测得氧化物阶段、硫化物阶段和碳酸盐阶段石英脉中包裹体均一温度分别为: 271~426 $^{\circ}\text{C}$ 、204~269 $^{\circ}\text{C}$ 和 175~211 $^{\circ}\text{C}$ (表 1 和图 6)。

氧化物阶段包含四种类型的包裹体,按所占的比例大小依次为 W 型(46%)、C 型(28%)、S 型(22%) 和 PC 型(4%)。W 型包裹体完全均一温度在 271~426 $^{\circ}\text{C}$,冰点介于 -20.0~0.8 $^{\circ}\text{C}$ 之间,根据冰点-盐度关系表估算得到的盐度为 1.4%~22.4% NaCleqv。包裹体密度为 0.75~0.90 g/cm^3 。C 型包裹体冷冻后回温测得 CO₂ 固相初熔温度范围在 -60~-56.7 $^{\circ}\text{C}$,均低于 CO₂ 三相点的温度(-56.6 $^{\circ}\text{C}$),暗示包裹体中可能含有 CH₄ 等其它气体组分,与激光拉曼光谱测试结果吻合;笼合物熔化温度为 0.4~9.8 $^{\circ}\text{C}$,根据 C 型包裹体笼合物熔化的温度计算得到盐度为 0.5%~15.1% NaCleqv;CO₂ 部分均一的温度在 10.2~21.2 $^{\circ}\text{C}$,对应的 CO₂ 相密度为 0.76~0.86 g/cm^3 ,包裹体密度为 0.93~0.97 g/cm^3 ;完全均一温度集中在 272~347 $^{\circ}\text{C}$ 之间,主要均一为气相(占 85%),少数均一为液相(约占 12%),少量包裹体在加热的过程中爆裂,爆裂温度为 390~426 $^{\circ}\text{C}$ 。S 型包裹体完全均一温度为 288~424 $^{\circ}\text{C}$,完全均一方式不固定,气相均一占

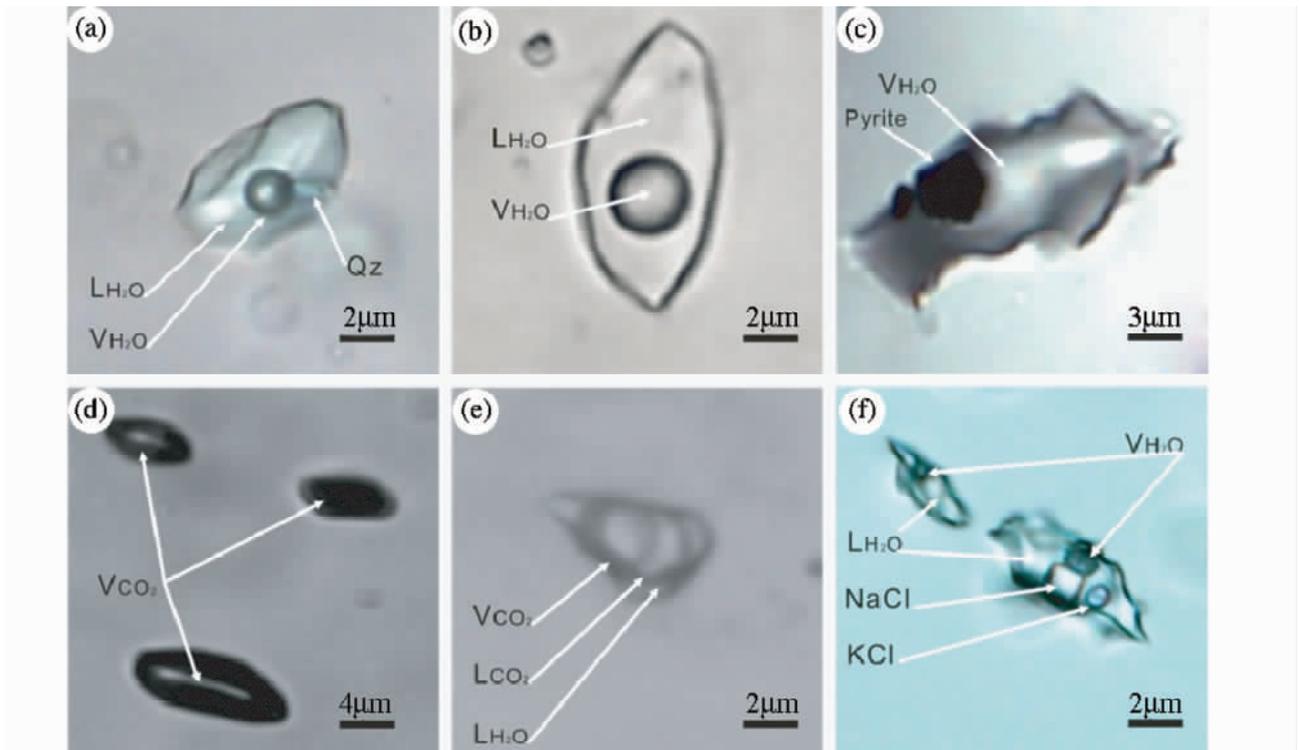


图5 塔拉特铁铅锌矿床石英矿物中流体包裹体显微照片

(a) -氧化物阶段的 S 型包裹体; (b) -碳酸盐阶段的 W 型包裹体; (c) -硫化物阶段的含黄铁矿 (pyrite) 包裹体; (d) -氧化物阶段的 PC 型包裹体; (e) -硫化物阶段的 C 型包裹体; (f) -氧化物阶段含 KCl 和 NaCl 子晶的包裹体

Fig. 5 Microphotographs of fluid inclusions in quartz from the Talate deposit

(a) -S-type inclusion in quartz-oxide stage; (b) -W-type inclusion in quartz-carbonate stage; (c) -pyrite-bearing inclusion in quartz-sulfide stage; (d) -the PC-type inclusion in the quartz-oxide stage; (e) -C-type inclusion in quartz-sulfide stage; (f) -halite- and sylvite-bearing S-type inclusion in quartz-oxide stage

67% 液相均一占 30% 较少数包裹体在加热过程中破裂, 回温过程中不能复原 (约 3%)。一般在升温的过程中, 子晶在未达到完全均一时熔化, 子晶熔化温度约 182 ~ 420°C 相应的盐度范围 30.5% ~ 40.6% NaCleqv。PC 型包裹体成群分布, 颜色呈黑褐色, 均为单相包裹体, 未能测得温度数据。氧化物阶段还含有少量次生 W 型包裹体 (约 3%), 均一温度在 180°C 左右, 次生包裹体多沿着裂隙分布, 包裹体气泡较小, 包裹体相比约 5% ~ 10%。

硫化物阶段包裹体主要为 W 型, 所占比例为 55%, 其次 C 型包裹体占 40%, PC 型包裹体最少约 5%。W 型包裹体冰点范围是 -11.6 ~ -0.1°C, 相应的盐度为 0.2% ~ 15.6% NaCleqv; 均一温度大约在 204 ~ 269°C 之间, 计算获得的包裹体密度为 0.84 ~ 0.91 g/cm³。C 型包裹体初始熔化的温度为 -59 ~ -56.8°C, 笼合物熔化温度集中在 5.4 ~ 8.2°C 之间, 由此获得盐度为 3.5% ~ 8.4% NaCleqv; CO₂ 部分均一的温度在 12.1 ~ 20.4°C, 对应的 CO₂ 相密度为 0.77 ~ 0.85 g/cm³ 左右, 密度为 0.91 ~ 0.95 g/cm³; 完全均一温度为 246 ~ 266°C, 主要为液相均一, 部分包裹体在均一前发生爆裂。PC 型包裹体成群分布, 颜色呈黑褐色, 均为单相包裹体, 未能测

得温度数据。

碳酸盐阶段全部为 W 型包裹体。包裹体冰点温度为 -6.5 ~ -0.6°C, 包裹体向液相均一, 完全均一温度为 175 ~ 211°C, 对应盐度和密度分别为 1.1% ~ 9.9% NaCleqv 和 0.90 ~ 0.94 g/cm³。

3.4 单个流体包裹体激光拉曼光谱分析

激光拉曼光谱测试结果如图 7 所示, 不同阶段相同类型的包裹体具有相似的谱线特征。C 型包裹体主要气相成分为 CO₂ (1285 cm⁻¹ 和 1388 cm⁻¹), 并含有 N₂ (2331 cm⁻¹) 和 CH₄ (2917 cm⁻¹), 此外还可检测出 H₂O 成分 (图 7a, d, e)。PC 型包裹体中除了 CO₂ 外还含有少量的 N₂ (图 7b, c)。W 型包裹体显示含有相对高强度的水峰 (图 7f)。S 型包裹体的气液相大部分为 H₂O 溶液, 少数含有 CO₂ 气体或液体, 拉曼光谱对透明的立方体子晶不具有鉴别能力。

氧化物阶段包裹体气相组分复杂多变, 基本含有 CO₂ + H₂O ± N₂ ± CH₄, 且具有较强的峰值, 说明气体的浓度较高 (图 7a-d)。硫化物阶段包裹体气相组分相对氧化物阶段有所减少, 基本都有水峰 (图 7e)。碳酸盐阶段大部分包裹体仅含

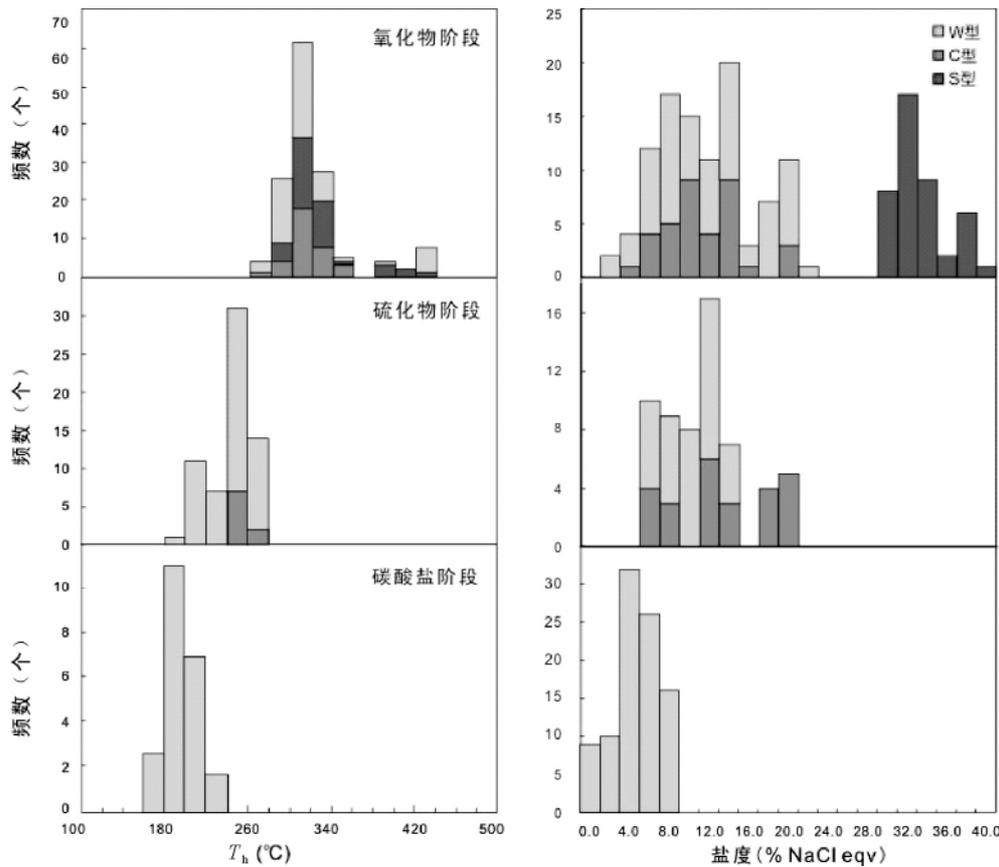


图6 塔拉特铁铅锌矿床不同阶段均一温度及盐度图解

Fig.6 Histograms of homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions in different stages for the Talate Fe-Pb-Zn deposit

表1 塔拉特铁铅锌矿床不同阶段石英矿物中流体包裹体显微测温结果

Table 1 Microthermometric data of the fluid inclusions in quartz of the Talate deposit

阶段	类型	T_m (°C)	$T_{m, \text{ch}}$ (°C)	T_{h, CO_2} (°C)	$T_{m, \text{jce}}$ (°C)	T_h (°C)	盐度 (wt% NaCl eqv)
氧化物	C型	-60 ~ -56.7	0.4 ~ 9.8	10.2 ~ 21.2		272 ~ 347	0.5 ~ 15.1
	S型					288 ~ 424	30.5 ~ 40.6
	W型				-20.0 ~ -0.8	271 ~ 426	1.4 ~ 22.4
硫化物	C型	-59 ~ -56.8	5.4 ~ 8.2	12.1 ~ 20.4		246 ~ 266	3.5 ~ 8.4
	W型				-11.6 ~ -0.1	204 ~ 269	0.2 ~ 15.6
碳酸盐	W型				-6.5 ~ -0.6	175 ~ 211	1.1 ~ 9.9

有水峰, 仅少数具有弱的 CO_2 峰, 且信号较强(图 7f)。

3.5 成矿压力和成矿深度估算

本文采用 Bowers and Helgeson (1983) 经验公式对氧化物、硫化物阶段的 C 型包裹体进行温度压力模拟计算。在 Fliacor 软件(Brown, 1989) 中选择 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 体系计算得出 C 型包裹体等容线。根据氧化物阶段 C 型包裹体均一温度范围获得的氧化物阶段压力为 124 ~ 232MPa, 硫化物阶段压力为 107 ~ 171MPa(图 8a, b)。成矿作用发生在上地壳, 上地壳岩石密度 $< 2.8 \text{g}/\text{cm}^3$, 静岩压力梯度为 $< 28 \text{MPa}/$

km。据此计算氧化物阶段对应深度为 4 ~ 8km, 硫化物阶段深度为 4 ~ 6km, 因此塔拉特铁铅锌矿氧化物、硫化物阶段成矿深度分别大致为 4 ~ 8km 和 4 ~ 6km。

4 讨论

4.1 成矿流体特征及演化

上述测温结果表明, 塔拉特铁铅锌矿成矿流体系统从早到晚发生规律性的变化, 主要体现在包裹体类型、温度、盐度和压力等方面的变化(图 9)。

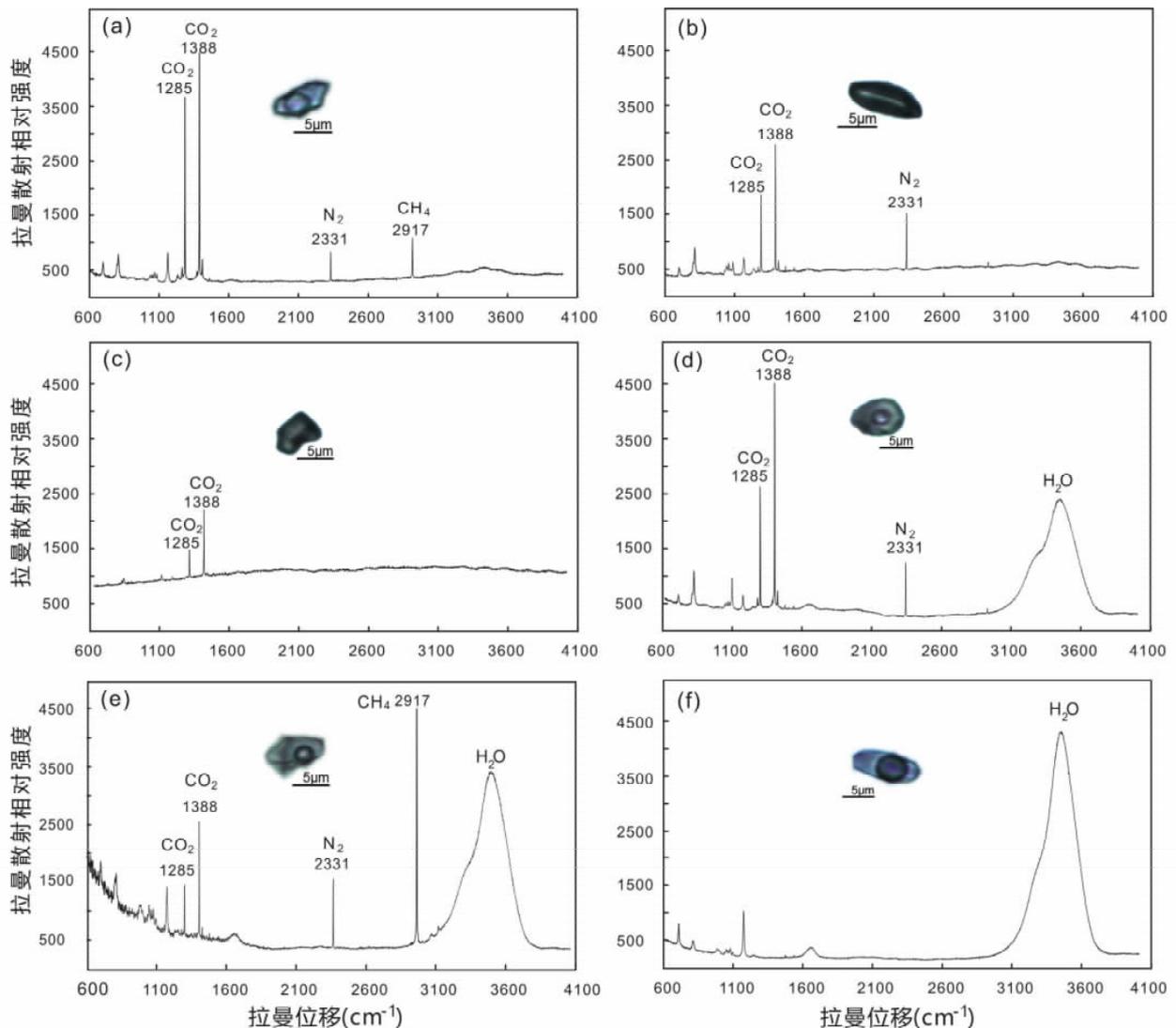


图7 塔拉特铁铅锌矿床流体包裹体激光拉曼谱图

(a) -氧化物阶段 C 型包裹体气泡成分为 CO_2 ; (b) -氧化物阶段 PC 型包裹体成分为 CO_2 , 并含有 N_2 ; (c) -氧化物阶段 PC 型包裹体成分为 CO_2 ; (d) -硫化物阶段 C 型包裹体主要成分为 CO_2 , 含有少量 N_2 和 H_2O ; (e) -硫化物阶段 C 型包裹体成分为 CO_2 和 H_2O , 含有 N_2 和 CH_4 ; (f) -碳酸盐阶段 W 型包裹体成分为 H_2O

Fig. 7 Representative Raman spectra of fluid inclusions for the Talate Fe-Pb-Zn deposit

(a) - CO_2 rich fluid inclusion in the QO stage containing N_2 or/and CH_4 ; (b, c) -the PC type fluid inclusion in the quartz of QO stage containing CO_2 ; (d) -the C type fluid inclusion in the QS stage containing CO_2 , N_2 and H_2O ; (e) -C type fluid inclusion in the QS stage containing CO_2 , N_2 , CH_4 and H_2O ; (f) - H_2O spectrum of W-type fluid inclusion in the QC stage

氧化物阶段以 W 型包裹体为主, 其次为 C 型和 S 型包裹体, 此外还有少量的 PC 型包裹体, 表明成矿初始流体为 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 体系。氧化物阶段包裹体组合具有中国大陆内部浆控高温热液矿床流体包裹体组合特征。流体包裹体均一温度为 $271 \sim 426^\circ\text{C}$, C 型和 W 型包裹体盐度为 $0.5\% \sim 22.4\%$ NaCleqv, S 型包裹体在加热过程中石盐子晶先于气泡消失, 子晶熔化温度为 $182 \sim 420^\circ\text{C}$, 对应盐度为 $30.5\% \sim 40.6\%$ NaCleqv。

硫化物阶段主要发育 C 型、W 型和 PC 型包裹体。流体

包裹体完全均一温度集中在 $204 \sim 269^\circ\text{C}$, 流体盐度较氧化物阶段稍有降低, C 型和 W 型包裹体盐度介于 $0.2\% \sim 15.6\%$ NaCleqv 之间, 指示了成矿系统流体具有中温中等盐度的特征, 沸腾包裹体组合的发育指示流体经历了沸腾作用(见下文)。

碳酸盐阶段全部为 W 型包裹体, 包裹体完全均一温度降低到 $175 \sim 211^\circ\text{C}$, 盐度也有所降低, 变化范围是 $1.1\% \sim 9.9\%$ NaCleqv, 为低温、低盐度 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系。这表明经历了硫化物阶段的流体沸腾、混合之后, 流体系统逐渐演化为

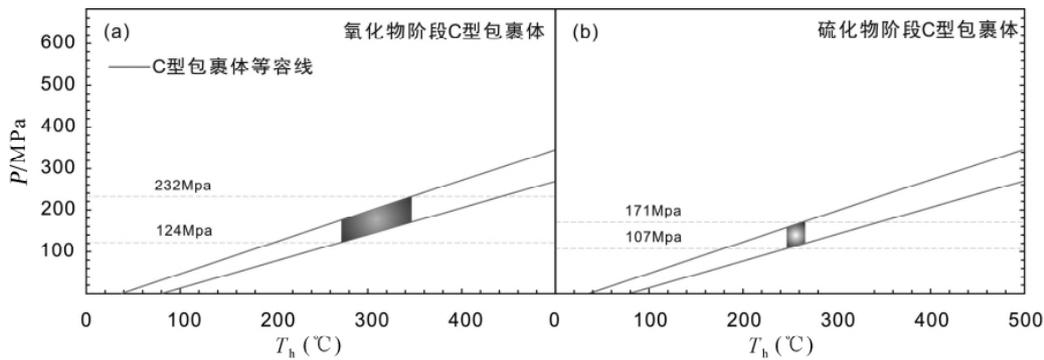


图8 塔拉特铁铅锌矿成矿压力估算图解

C型包裹体等容线通过 FLINCOR 软件计算获得(据 Brown and Lamb ,1989)

Fig.8 Diagram showing the estimated trapping pressure for the Talate Fe-Pb-Zn deposit

Isochors of the C-type fluid inclusions are calculated using the FLINCOR software (after Brown and Lamb ,1989)

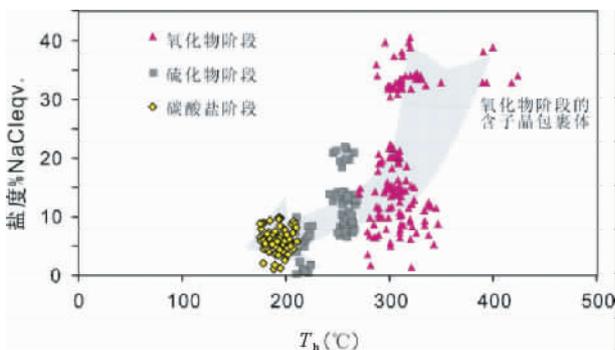


图9 塔拉特流体成矿系统均一温度、盐度及其演化

Fig.9 Temperatures and salinities and their evolution of the Talate ore-forming fluid-system

以大气降水为主的热液体系。

综上所述,初始成矿热液具有高温、高盐度、富 CO₂ 的特点,伴随着成矿作用的进行,流体温度、盐度和 CO₂ 含量逐渐降低,碳酸盐阶段流体为低温、低盐度、贫 CO₂ 的大气降水热液;流体的演化特点与陆内环境的浆控高温热液矿床一致。

4.2 流体沸腾与成矿物质沉淀

流体包裹体测温结果显示,主成矿阶段的包裹体类型复杂,同一视域中可见 W 型、C 型、PC 型包裹体密切共生(图 10b)。C 型包裹体相比差异明显,均一方式不尽相同,约 30% 均一为液相,70% 均一为气相;W 型包裹体普遍均一至液相。这种不同类型包裹体均一方式不同,而均一温度相近,是沸腾包裹体组合的典型特征(卢焕章等,2004),表明塔拉特铁铅锌矿在成矿过程中发生了沸腾作用。氧化物阶段压力为 124~232MPa,硫化物阶段压力为 107~171MPa,流体压力变化较大,也是流体不混溶或沸腾的标志(Chen *et al.*, 2004, 2005, 2006),是压力阀模式控制的结果(陈衍景等,2007)。对比发现,氧化物阶段的包裹体富气相(图 10a),碳酸盐阶段的包裹体富液相(图 10c),而硫化物阶段

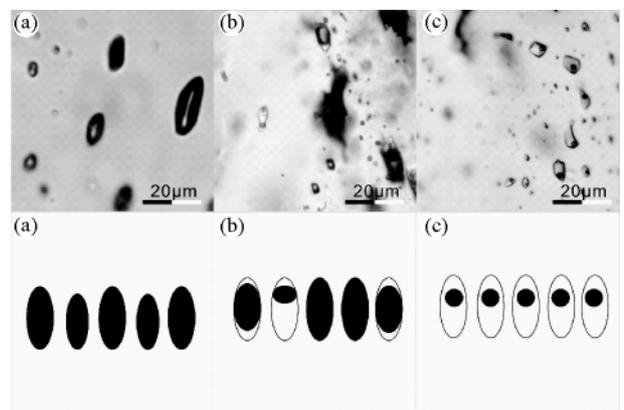


图10 塔拉特铁铅锌矿床流体演化特征

(a)-氧化物阶段富气相包裹体,黑色代表气相;(b)-石英硫化物阶段富气和富液相包裹体共存,黑色代表气相,白色代表液相;(c)-石英碳酸盐阶段富液相包裹体,黑色代表气相,白色代表液相

Fig. 10 Histograms of homogenization temperatures and salinity of fluid inclusion in Talate Fe-Pb-Zn deposit

(a)-vapor rich fluid inclusions in QO stage, black part representing the volume of vapor; (b)-vapor rich coexist with liquid rich fluid inclusions in QS stage, the black and white representing vapor and liquid respectively; (c)-liquid rich fluid inclusions in QC stage

的包裹体组合具有富液相和富气相共生的特点(图 10b),同样是流体沸腾佐证。因此,可以认为硫化物阶段经历了强烈的流体沸腾作用。

大量研究表明,流体沸腾能够加速成矿物质卸载,许多矿床成因与流体沸腾关系密切(Zhang *et al.*, 2012a, b; Deng *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2011, 2012a, b, c; Zheng *et al.*, 2012)。Moncada *et al.* (2012) 通过统计分析发现,流体沸腾能促使矿石品位的增加。

4.3 矿床成因类型及成矿过程

总体而言,前人(马忠美等,2001; 提拉古丽,2009; 袁

建江等, 2011) 认为塔拉特铁铅锌矿床为 VMS 型或类似的同生沉积矿床。然而, VMS 型矿床形成于海底热液喷流作用, 不但在空间、时间和成因上与火山作用密切相关, 顺层产出, 常有共生的重晶石层; 而且, 成矿流体主要为静水压力体系的循环海水, 流体包裹体以水溶液为主, 不应出现富 CO_2 包裹体, 压力通常低于 50MPa (Zaw *et al.*, 1996; David *et al.*, 2005; Franklin *et al.*, 2005; 倪培等, 2005; 陈衍景等, 2007; Pirajno, 2009)。本文研究发现, 塔拉特铁铅锌矿床发育矽卡岩矿物组合(主要为石榴子石), 初始成矿流体显示高温、高盐度、高 CO_2 的特征, 具有浆控高温热液矿床的特征(陈衍景等, 2007), 应确定为矽卡岩型。

最新研究表明, 阿尔泰山缘在二叠纪-三叠纪期间经历了古亚洲洋闭合、弧-陆碰撞、陆-陆碰撞等过程 (Xiao *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2012), 形成了大量变质岩、花岗岩类 (陈汉林等, 2006; 胡霏琴等, 2006; Zheng *et al.*, 2007) 以及不同类型的热液矿床, 如蒙库矽卡岩型铁矿 (Wan *et al.*, 2010), 铁木尔特造山型铅锌矿 (郑义等, 2010; Zhang *et al.*, 2012b), 乌拉斯沟造山型铜矿 (Zheng *et al.*, 2012)。塔拉特铁铅锌矿床与铁木尔特铅锌矿、乌拉斯沟铜矿等三叠纪矿床同属阿巴宫成矿带, 矿区喇嘛昭岩体侵入于康布铁堡组火山岩-碳酸盐岩建造 (图 2), 形成于 $276 \pm 9\text{Ma}$ (王涛等, 2005), 证明成矿作用不晚于 276Ma, 应是碰撞造山环境。

综上所述, 塔拉特铁铅锌矿床地质特征、流体包裹体特征和区域地质演化历史等, 均显示其为后生的矽卡岩型矿床, 而非与泥盆系围岩同生的 VMS 型矿床。

4.4 勘查方向

阿尔泰山南缘多金属成矿带富含铜、铅、锌、金、银, 是阿尔泰山带中重要的成矿带, 阿尔泰山带中从北向南依次是冲乎尔盆地、克兰盆地、麦兹盆地, 盆地内断裂构造发育, 岩浆活动强烈, 许多矿床成因饱受争议, 通过对成矿流体的研究, 可以很好的复原矿床与岩体、矿床与围岩的复杂关系, 如此, 流体来源问题成为解释矿床成因的关键。

根据我们对铁木尔特、乌拉斯沟、塔拉特等矿床的研究, 我们建议今后的找矿勘查应重视寻找沿断裂带发育的造山型矿床, 在古生代末及其以后发育的中酸性侵入体接触带的矽卡岩型矿床, 找矿思路不能局限于同生沉积的层控的 VMS 型或 SEDEX 型。

5 结论

(1) 塔拉特铁铅锌矿为矽卡岩型铅锌矿床, 成矿过程可分为 4 个成矿阶段, 即矽卡岩、氧化物、硫化物和碳酸盐阶段, 后 3 个阶段均有石英共生。

(2) 氧化物阶段发育有四种类型的包裹体: 水溶液包裹体、纯 CO_2 、 CO_2 - NaCl - H_2O 和含子矿物包裹体; 硫化物阶段发育有水溶液包裹体、 CO_2 - NaCl - H_2O 型、及少量纯 CO_2 型包裹

体; 碳酸盐阶段只含有 W 型的包裹体。

(3) 氧化物阶段包裹体均一温度介于 $271 \sim 426^\circ\text{C}$, 盐度为 $0.5\% \sim 22.4\%$ NaCleqv, 另外 S 型包裹体盐度为 $30.5\% \sim 40.6\%$ NaCleqv; 硫化物阶段为多金属硫化物沉淀阶段, 流体包裹体均一温度 $204 \sim 269^\circ\text{C}$, 盐度则介于 $0.2\% \sim 15.6\%$ NaCleqv 之间; 碳酸盐阶段均一温度集中在 $175 \sim 211^\circ\text{C}$, 盐度为 $1.1\% \sim 9.9\%$ NaCleqv。从氧化物阶段到碳酸盐阶段, 成矿流体由中高温、富 CO_2 的变质热液演化为贫 CO_2 、低温的大气降水热液。硫化物阶段成矿流体发生明显的沸腾作用。矿床属于中高温热液矿床, 成矿深度约 $4 \sim 6\text{km}$ 。

致谢 研究工作在陈衍景教授指导下完成; 野外工作得到国家 305 项目办公室和新疆有色局 706 队的大力支持; 包裹体测试工作得到杨永飞同学的帮助; 在此表示感谢!

References

- Barton Pb and Philip MB. 1987. Chalcopyrite disease in sphalerite: Pathology and epidemiology. *American Mineralogist*, 72(5-6): 451-467
- Bodnar RJ. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H_2O -NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683-684
- Bowers TS and Helgeson HC. 1983. Calculation of the thermodynamic and geochemical consequences of nonideal mixing in the system H_2O - CO_2 -NaCl on phase relations in geologic systems: Equation of state for H_2O - CO_2 -NaCl fluid at high pressures and temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47(7): 1247-1275
- Brown PE. 1989. Flincor: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion date. *American Mineralogist*, 74: 1390-1393
- Chai FM, Mao JW, Dong LH, Yang FQ, Liu F, Geng XX and Zhang ZX. 2009. SHRIMP zircon geochronology of the metarhyolites from the Kangbutiebao Formation in the Kelang basin at the southern margin of the Altay, Xinjiang and its implications. *Gondwana Research*, 16(2): 189-200
- Chen HL, Yang SF, Li ZL, Yu X, Xiao WJ, Yuan C and Li JL. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb chronology of Fuyun basic granulite and its tectonic significance in Altaid orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1351-1358 (in Chinese with English abstract)
- Chen HY, Chen YJ and Liu YL. 2001. Metallogenesis of the Ertix gold belt, Xinjiang and its relationship to Central Asia-type orogenesis. *Science in China (Series D)*, 44(3): 245-255
- Chen YJ and Fu SG. 1992. Gold Mineralization in West Henan. Beijing: Seismological Press, 1-234 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ. 2000. Progress in the study of Central Asia-type orogenesis-metallogenesis in Northwest China. *Geological Journal of China Universities*, 6(1): 17-22 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Pirajno F and Sui YH. 2004. Isotope geochemistry of the Tieluping silver-lead deposit, Henan, China: A case study of orogenic silver-dominated deposits and related tectonic setting. *Mineralium Deposita*, 39(5-6): 560-575
- Chen YJ, Pirajno F and Sui YH. 2005. Geology and D-O-C isotope systematics of the Tieluping silver deposit, Henan, China: Implications for ore genesis. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 106-119 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Pirajno F, Qi JP, Li J and Wang HH. 2006. Ore geology, fluid geochemistry and genesis of the Shangong gold deposit, eastern Qinling Orogen, China. *Resource Geology*, 56(2): 99-116
- Chen YJ, Chen HY, Zaw K, Pirajno F and Zhang ZJ. 2007.

- Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview. *Ore Geology Reviews*, 31(1-4): 139-169.
- Chen YJ, Ni P, Fan HR, Pirajno F, Lai Y, Su WC and Zhang H. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2085-2108 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ and Li N. 2009. Nature of ore-fluids of intracratonic intrusion-related hypothermal deposits and its difference from those in island arcs. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2477-2508 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Pirajno F, Li N, Guo DS and Lai Y. 2009. Isotope systematics and fluid inclusion studies of the Qiyugou breccia pipe-hosted gold deposit, Qinling Orogen, Henan Province, China: Implications for ore genesis. *Ore Geology Reviews*, 35(2): 245-261
- Chen YJ and Wang Y. 2011. Fluid inclusion study of the Tangjiaping Mo deposit, Dabie Shan, Henan Province: Implications for the nature of the porphyry systems of post-collisional tectonic settings. *International Geology Review*, 53(5-6): 635-655
- Chen YJ, Pirajno F, Wu G, Qi JP and Xiong XL. 2012. Epithermal deposits in North Xinjiang, NW China. *International Journal of Earth Sciences*, 101(4): 889-917
- Collins PLF. 1979. Gas hydrates in CO₂-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity. *Economic Geology*, 74(6): 1435-1444
- David AV and Wolfgang B. 2005. Heating and freezing experiments on aqueous fluid inclusions in anhydrite: Recognition and effects of stretching and the low-temperature formation of gypsum. *Chemical Geology*, 223(1-3): 35-45
- Deng XH, Chen YJ, Santosh M and Yao JM. 2012. Genesis of the 1.76Ga Zhaiwa Mo-Cu and its link with the Xiong'er volcanics in the North China Craton: Implications for accretionary growth along the margin of the Columbia supercontinent. *Precambrian Research*, doi: 10.1016/j.precamres.2012.02.014
- Franklin JM, Gibson HL, Jonasson IR and Galley AG. 2005. Volcanogenic massive sulfide deposits. *Economic Geology* 100th Anniversary Volume, Society of Economic Geologists: 523-560
- Frezzotti ML, Tecce F and Casagli A. 2012. Roman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 112: 1-20
- Geng XX, Yang FQ, Yang JM, Guo ZL, Guo XJ, Huang CK, Liu F, Chai FM and Zhang ZX. 2010. Stable isotope characteristics of Tiemete Pb-Zn deposit in Altay, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 29(6): 1088-1100
- He GQ, Liu DQ, Li MS, Tang YL and Zhou RH. 1995. The five stage model of crustal evolution and metallogenic series of chief orogenic belt in Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 13(2): 99-196 (in Chinese with English abstract)
- Hu AQ, Wei GJ, Deng WF and Chen LL. 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating and its significance for gneisses from the southwest area to Qinghe County in the Altai, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 1-10 (in Chinese with English abstract)
- Li N, Chen YJ, Fletcher LR and Zeng QT. 2011. Triassic mineralization with Cretaceous overprint in the Dahu Au-Mo deposit, Xiaoqinling gold province: Constraints from SHRIMP monazite U-Th-Pb geochronology. *Gondwana Research*, 20(2-3): 543-552
- Li N, Chen YJ, Pirajno F, Gong HJ, Mao SD and Ni ZY. 2012a. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, trace element and Hf isotope geochemistry of the Heyu granite batholith, eastern Qinling, central China: Implications for Mesozoic tectono-magmatic evolution. *Lithos*, 142-143: 34-47
- Li N, Chen YJ, Ulrich T and Lai Y. 2012b. Fluid inclusion study of the Wunugetu Cu-Mo deposit, Inner Mongolia, China. *Mineralium Deposita*, 47(5): 467-482
- Li N, Ulrich T, Chen YJ, Thomsen TB, Pease V and Pirajno F. 2012c. Fluid evolution of the Yuchiling porphyry Mo deposit, East Qinling, China. *Ore Geology Reviews*, 48: 442-459
- Liu F, Li YH, Mao JW, Yang FQ, Chai FM, Geng XX and Yang ZX. 2008. SHRIMP U-Pb Ages of the Abagong Granites in the Altay Orogen and Their Geological Implications. *Acta Geoscientifica Sinica*, 29(6): 795-804 (in Chinese with English abstract)
- Liu F, Yang FQ, Li YH, Ma BY, Chai FM and Geng XX. 2009. Trace element and rare earth element characteristics of apatite from Abagong iron deposit in Altay City, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 28(3): 251-264 (in Chinese with English abstract)
- Lu HZ, Fan HR, Ni P, Ou XG, Shen K and Zhang WH. 2004. Fluid Inclusion. Beijing: Science Press, 1-487 (in Chinese)
- Ma ZM, Qiu YJ and Guo XJ. 2001. Sarekuobu-Tiemete gold polymetallic metallogenic series in Xinjiang. *Geology and Prospecting*, 37(4): 23-26 (in Chinese with English abstract)
- Moncada D, Mutchler S, Nieto A, Reynolds TJ, Rimstidt JD and Bodnar RJ. 2012. Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag-Au deposits at Guanajuato, Mexico: Application to exploration. *Journal of Geochemistry Exploration*, 114: 20-35
- Ni P, Tian JH, Zhu XT, Ling HF, Jiang SY and Gu LX. 2005. Fluid inclusion studies on footwall stringer system mineralization of Yongping massive copper deposit, Jiangxi Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5): 1339-1346 (in Chinese with English abstract)
- Pirajno F. 2009. Hydrothermal Processes and Mineral Systems. Geological Survey of Western Australia: Springer, 1-1250
- Shi YX, Li N and Yang Y. 2009. Ore geology and fluid inclusion geochemistry of the Sandaozhuang Mo-W deposit in Luanchuan County, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2575-2587 (in Chinese with English abstract)
- Sibson RH, Robert F and Poulsen KH. 1988. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposit. *Geology*, 16: 551-555
- Sun M, Yuan C, Xiao WJ, Long XP, Xia XP, Zhao GC, Lin SF, Wu FY and Kroner A. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotope study of gneissic rocks from the Chinese Altai: Progressive accretionary history in the Early to Middle Palaeozoic. *Chemical Geology*, 247(3-4): 352-383
- Tiras G. 2009. The geological characteristics and genesis of Talate in Altay, Xinjiang. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 32(4): 13-15 (in Chinese)
- Wan B, Zhang LC and Xiao WJ. 2010. Geological and geochemical characteristics and ore genesis of the Keketale vms Pb-Zn deposit, southern Altay Metallogenic Belt, NW China. *Ore Geology Review*, 37(2): 114-126
- Wang JB, Qin KZ, Wu ZL, Hu JH and Deng JN. 1998. Volcanic Exhalative-Sedimentary Lead Zinc Deposits in the Southern Margin of the Altay, Xinjiang. Beijing: Geological Publishing House, 1-210 (in Chinese)
- Wang T, Hong DW, Tong Y, Hang BF and Shi YR. 2005. Zircon U-Pb SHRIMP age and origin of post-orogenic Lamazhao granitic pluton from Altai orogen: Its implications for vertical continental growth. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 640-650 (in Chinese with English abstract)
- Wang Y, Chen YJ, Ma HW and Xu YL. 2009. Study on ore geology and fluid inclusions of the Tangjiaping Mo deposit, Shangcheng County, Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 468-480 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Han CM, Yuan C, Chen HL, Sun M, Lin SF, Li ZL, Mao QG, Zhang JE, Sun S and Li JL. 2006. Unique Carboniferous-Permian tectonic-metallogenic framework of northern Xinjiang (NW China): Constraints for tectonics of the southern Paleasian Domain. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1062-1076 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Windley BF, Huang BC, Han CM, Yuan C, Chen HL, Sun M, Sun S and Li JL. 2009. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altai: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1189-1217
- Yang FQ, Guo XJ, Huang CK, Liu F, Chai FM, Geng XX and Zhang BJ. 2012. Metallogenesis of the Tuomoerte Fe-(Mn) deposit in Altay, Xinjiang. *Rock and Mineral Analysis*, 31(5): 906-914

(in Chinese with English abstract)

- Yang YF, Li N and Yang Y. 2009. Fluid inclusion study of the Jinduicheng porphyry Mo deposit, Hua County, Shaanxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2983–2993 (in Chinese with English abstract)
- Yang YF, Li N and Chen YJ. 2012. Fluid inclusion study of the Nannihu giant porphyry Mo-W deposit, Henan Province, China: Implications for the nature of porphyry ore-fluid systems formed in a continental collision setting. *Ore Geology Reviews*, 46: 83–94
- Yang YF, Chen YJ, Li N, Mi M, Xu YL and Wan SQ. 2013. Fluid inclusion and isotope geochemistry of the Qian'echong giant porphyry Mo deposit, Dabie Shan, China: A case of NaCl-poor, CO₂-rich fluid systems. *Journal of Geochemical Exploration*, 124: 1–13
- Yuan JJ, Wang HL, Zhang HJ, Yang XF and Kang JC. 2011. Geological characteristics and prospecting direction of the Talate Fe-Pb-Zn deposit in Altay, Xinjiang. *Science Frontier*, (23): 61–64 (in Chinese)
- Zaw K, Gemmell JB, Large RR, Mernagh TP and Ryan CG. 1996. Evolution and source of ore fluids in the stringer system, Hellyer VHMS deposit, Tasmania, Australia: Evidence from fluid inclusion microthermometry and geochemistry. *Ore Geology Reviews*, 10(3–6): 251–278
- Zhang L, Chen HY, Chen YJ, Qin YJ, Liu CF, Zheng Y and Jansen N. 2012a. Geology and fluid evolution of the Wangfeng orogenic-type gold deposit, western Tian Shan, China. *Ore Geology Reviews*, 49: 85–95
- Zhang L, Zheng Y and Chen YJ. 2012b. Ore geology and fluid inclusion geochemistry of the Tiemurt Pb-Zn-Cu deposit, Altay, Xinjiang, China: A case study of orogenic-type Pb-Zn systems. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 69–79
- Zheng CQ, Kato T, Enami M and Xu XC. 2007. CHIME monazite ages of metasediments from Altai orogen in northwestern China: Devonian and Permian ages of metamorphism and their significance. *Island Arc*, 16(4): 598–604
- Zheng Y, Zhang L, Liu CF and Qin YJ. 2010. The fluid evolution and genesis of the Tiemurt lead-zinc-copper deposit, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 29(Suppl.): 629–630 (in Chinese)
- Zheng Y, Zhang L, Chen YJ, Qin YJ and Liu CF. 2012. Geology, fluid inclusion geochemistry, and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of the Wulasigou Cu deposit, and their implications for ore genesis, Altay, Xinjiang, China. *Ore Geology Reviews*, 49: 128–140
- Zhou B, Gu LX, Zhang WL and Duan W. 1999. The replacement origin of “chalcopyrite disease” in sphalerite in the Meixian deposit. *Geological Review*, 45(1): 15–19 (in Chinese with English abstract)
- 张志欣. 2010. 新疆阿尔泰铁木尔特铅锌矿床稳定同位素组成特征. *矿床地质*, 29(6): 1088–1100
- 何国琦, 刘德权, 李茂松, 唐延龄, 周汝红. 1995. 新疆主要造山带地壳发展的五阶段模式及成矿系列. *新疆地质*, 13(2): 99–196
- 胡霏琴, 韦刚健, 邓文峰, 陈林丽. 2006. 阿尔泰地区青河县西南片麻岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. *岩石学报*, 22(1): 1–10
- 刘锋, 李延河, 毛景文, 杨富全, 柴凤梅, 耿新霞, 杨宗喜. 2008. 阿尔泰造山带阿巴宫花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义. *地球学报*, 29(6): 795–804
- 刘锋, 杨富全, 李延河, 马宝钦, 柴凤梅, 耿新霞. 2009. 新疆阿勒泰市阿巴宫铁矿磷灰石微量和稀土元素特征及矿床成因探讨. *矿床地质*, 28(3): 251–264
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 2004. 流体包裹体. 北京: 科学出版社, 1–487
- 马忠美, 仇银江, 郭旭吉. 2001. 萨热阔布-铁米尔特矿区金铅锌成矿系列. *地质与勘探*, 37(4): 23–26
- 倪培, 田京辉, 朱筱婷, 凌洪飞, 蒋少涌, 顾连兴. 2005. 江西永平铜矿下盘网脉状矿化的流体包裹体研究. *岩石学报*, 21(5): 1339–1346
- 石英霞, 李诺, 杨艳. 2009. 河南省栾川县三道庄钼矿床地质和流体包裹体研究. *岩石学报*, 25(10): 2575–2587
- 提拉古丽. 2009. 新疆阿勒泰市塔拉特铁铅锌矿地质特征及成因初探. *新疆有色金属*, 32(4): 13–15
- 王京彬, 秦克章, 吴志亮, 胡剑辉, 邓吉牛. 1998. 阿尔泰山南缘火山喷流沉积型铅锌矿床. 北京: 地质出版社, 1–210
- 王涛, 洪大卫, 童英, 韩宝福, 石玉若. 2005. 中国阿尔泰造山带后造山喇嘛昭花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄、成因及陆壳垂向生长意义. *岩石学报*, 21(3): 640–650
- 王运, 陈衍景, 马宏卫, 徐友灵. 2009. 河南省商城县汤家坪钼矿床地质和流体包裹体研究. *岩石学报*, 25(2): 468–480
- 肖文交, 韩春明, 袁超, 陈汉林, 孙敏, 林寿发, 厉子龙, 毛启贵, 张继恩, 孙枢, 李继亮. 2006. 新疆北部石炭纪-二叠纪独特的构造-成矿作用对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约. *岩石学报*, 22(5): 1062–1076
- 杨富全, 郭旭吉, 黄承科, 刘锋, 柴凤梅, 耿新霞, 张保江. 2012. 新疆阿尔泰托莫尔特铁(锰)矿成矿作用. *岩矿测试*, 31(5): 906–914
- 杨永飞, 李诺, 倪智勇. 2009. 陕西省华县金堆城斑岩型钼矿床流体包裹体研究. *岩石学报*, 25(11): 2983–2993
- 袁建江, 王海宁, 张红军, 杨晓峰, 康吉昌. 2011. 新疆阿勒泰市塔拉特铁铅锌矿床地质特征及找矿方向. *科教前沿*, (23): 61–64
- 郑义, 张莉, 刘春发, 秦雅静. 2010. 铁木尔特铅(铜)矿床流体演化特征与矿床成因. *矿床地质*, 29(增刊): 629–630
- 周兵, 顾连兴, 张文兰, 段芸. 1999. 福建小溪梅仙矿床闪锌矿中黄铜矿交生体的交代成因. *地质评论*, 45(1): 15–19

附中文参考文献

- 陈汉林, 杨树锋, 厉子龙, 余星, 肖文交, 袁超, 林秀斌, 李继亮. 2006. 阿尔泰造山带富蕴基性麻粒岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其构造意义. *岩石学报*, 22(5): 1351–1358
- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律. 北京: 地震出版社, 1–234
- 陈衍景. 2000. 中国西北地区中亚型造山-成矿作用的研究意义和进展. *高校地质学报*, 6(1): 17–22
- 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征. *岩石学报*, 23(9): 2085–2108
- 陈衍景, 李诺. 2009. 大陆内部浆控高温热液矿床成矿流体性质及其与岛弧区同类矿床的差异. *岩石学报*, 25(10): 2477–2508
- 耿新霞, 杨富全, 杨建民, 郭正林, 郭旭吉, 黄承科, 刘锋, 柴凤梅,